

論文

[1095] 塩害による鋼材腐食に関する暴露実験

正会員 ○大城 武 (琉球大学工学部)

正会員 谷川 伸 (東亜合成化学工業研究所)

1. まえがき

本研究は、亜熱帯性気候下の沖縄県で、海岸に隣接して設置した暴露構造物を対象とし、7年間にわたりその劣化の過程を解明することを目的としている。本暴露構造物は、昭和59年9月に設置され、研究成果はこれまで報告を行ってきた¹⁾。ここでは、約4年半経過時に行った実験結果を記述し、これまでの結果との比較検討を行っている。本実験では、これまで行ってきたクラック発生状況の把握、自然電位の経時変化、塩分浸透量、及び鉄筋の腐食面積測定等に加えて、今年度から非破壊試験として分極抵抗及び液抵抗の測定を行なっている。

2. 試験概要及び結果

2-1 試験概要

本試験のため、沖縄県本部町備瀬岬に塩害暴露構造物を設置している。設置位置は三面が海に隣接し、年間を通じて海塩粒子を含む潮風の影響を強く受け、下部の柱では強風時に直接波しぶきがかかる。さらに、亜熱帯性気候による高温多湿の気候条件をうけ、コンクリート中の鉄筋腐食に関しては厳しい環境下にある。本構造物は、屋上に上部角出し柱(角柱)を有し、その概要を図-1に示している。

使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比63%、スランプ18cmのAEコンクリートで、その調合表を表-1に示す。

表-1 コンクリート調合表

粗骨の 最大寸法 (mm)	スランプ (mm)	空気量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg / m ³)					混 和 材 減水 (AE) (kg / m ³)
					水	セメント	海砂	砕砂	粗骨材	
20	18	4	63	51.5	183	291	421	516	900	2.91%

コンクリートのかぶり厚は一律 4cmとしているが、スラブのみ 3cmを採用している。また、構造物の東側半部は、コンクリート重量に換算して0.5%の塩分 (NaCl) を練り混ぜ水に溶解させて初期混入している。

スラブ上の角柱(角柱11, 12, 13, 14) からコアーを採取し、その後、鉄筋の腐食面積を測定している。測定は腐食部分をマイラー紙にトレースし、その面積を自動面積計プラニメックス(日本レギュレーターKK製作)で測定し、腐食面積率を計算している。

スラブ下の柱については、アクリル系塗膜を有しない柱(柱4, 5, 12, 9, 10, 14) について、自然電位、分極抵抗及び液抵抗の測定を行っている。又、各柱について、

クラック幅の測定も行っている。

2-2 塩分濃度分布

角柱及び柱から採取したコアをスライスし、銀イオン選択性電極を用いた電位差滴定法で塩分濃度の測定を行ない、コンクリートの重量に対する可溶性塩分の重量比 (%) として表している。

昭和63年12月に測定した柱12、角柱11、12、13、14、の塩分濃度を図-2、3に示し、昭和60年12月に測定した角柱1、6との比較を行なっている。

図-2は、無塩部（初期混入塩分0%）の塩分濃度分布を示している。スラブ下の柱12について、第1面から第3面に貫通して採取したコアが最も大きな塩分濃度と浸透深さを表し、同様に、第2面から第4面のコアも大きな塩分濃度を表している。分布形状は、海に面した第1面と第2面に大きく、外部環境の影響の差違を示している。昭和62年に測定した有塗膜の柱1の塩分濃度も図中に示している。この柱と上記の柱12を比較すると、塗膜の遮塩効果が明らかになる。角柱12も上記の柱12と同様に無塗膜部であり、第1面及び第2面は、第3、4面に比較して、海洋環境の影響を強く受け、塩分濃度は大きい。しかし、角柱12と柱12には、塩分浸透量で大きく相違がある。この原因としては、海水の飛沫を受ける度合が下部の柱12の方が大きく、又、角柱は雨水で洗い流されて、表面濃度が増加しないためである。角柱12と角柱11の比較が塗膜による遮塩効果を表している。さらに、角柱11と角柱1（昭和60年測定）の比較では、表層部での塩分増加が見られない。このことは、表層部の塩分濃度が、コンクリート打設から塗膜施工までの5か月間に浸透したものであることを示している。

図-3に有塩部（初期混入塩分 0.5%）の角柱6、13、14の塩分濃度を示している。初期に塩分を混入しているため、内部において平均して0.4%の塩分を示しているが、表面に近くなると無塗膜の場合には濃度が増加する傾向がある。

2-3 腐食面積率

鉄筋の腐食面積率を求め、その結果を表-2に示す。この表には鉄筋周辺の塩分量も記入している。柱1、5、6、10は3・5年後（昭和62年度）の測定結果、角柱11、12、13、14は4・5年後（昭和63年度）の測定結果である。無塩部で有塗膜の柱1、及び角柱11の腐食面積率が小さいのは、塗膜により塩分および腐食要因の水と酸素の浸透が阻止されているためである。無塩部で無塗膜の柱5および角柱12については、第1面および第2面で塩分量に対応して腐食面積率も高くなっている。角柱12は柱5よりも塩分濃度が低いにもかかわらず腐食面積率は高くなっている。このことは、

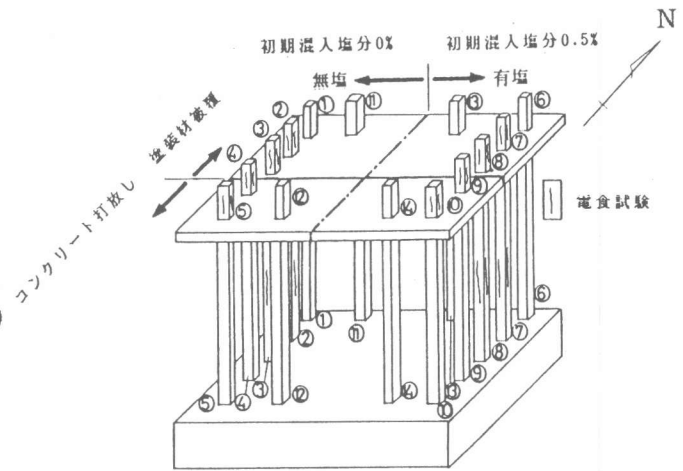


図-1 暴露構造物

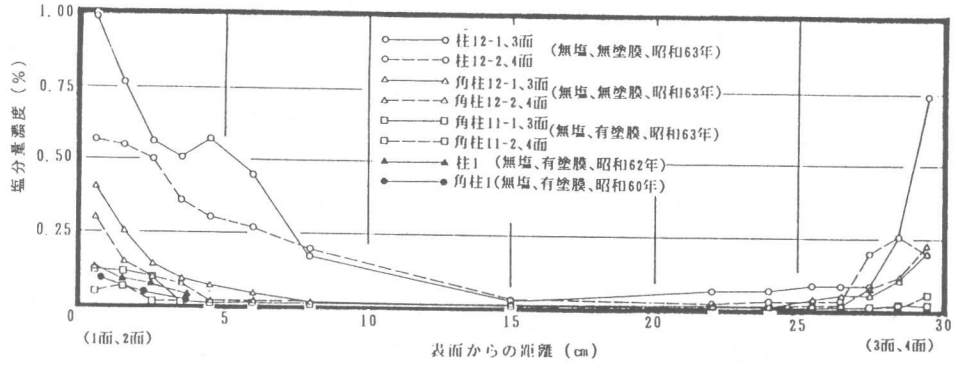


図-2 塩分濃度分布図 (無塩部)

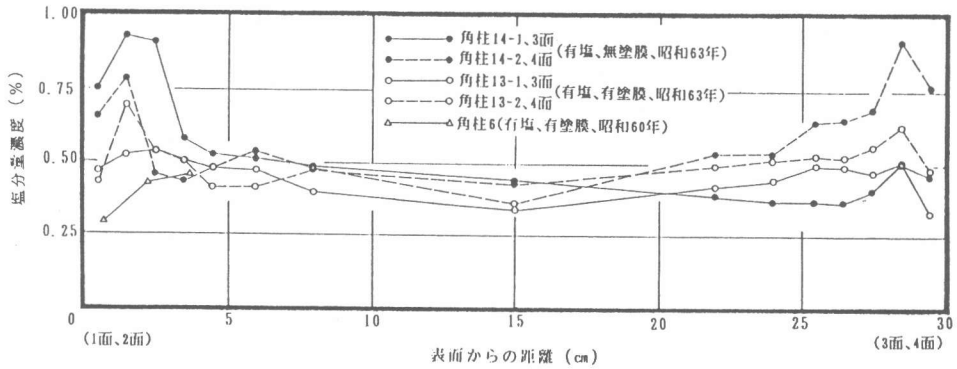


図-3 塩分濃度分布図 (有塩部)

表-2 鉄筋の腐食面積率

柱番号	面	腐食面積率(%)	塩分量濃度(%)	柱番号	面	腐食面積率(%)	塩分量濃度(%)
柱 1	1	1.4	0.134	角柱11	1	1.6	0.013
	2	1.5	0.143		2	0	0.014
	3	0.9	0.059		3	0	0.015
	4	2.1	0.060		4	0	0.014
柱 5	1	12.1	0.880	角柱12	1	67.4	0.092
	2	11.6	0.437		2	43.0	0.075
	3	1.2	0.127		3	7.6	0.049
	4	3.1	0.168		4	34.0	0.16
柱 6	1	1.1	0.590	角柱13	1	23.4	0.508
	2	1.7	0.497		2	19.3	0.506
	3	5.9	0.468		3	4.7	0.491
	4	0.5	0.496		4	16.0	0.524
柱 10	1	100.0	0.694	角柱14	1	97.2	0.582
	2	100.0	0.408		2	93.5	0.473
	3	100.0	0.583		3	64.5	0.374
	4	100.0	0.645		4	66.5	0.650

角柱12の暴露期間が1年間多いことに加えて、角柱の位置が屋上で、高温下の乾湿繰り返しを強く受けることが原因と考えられる。有塩部で有塗膜の柱6と角柱13は、高濃度の塩分が鉄筋周辺に存在するにもかかわらず腐食面積率が低い。このことは、初期に高濃度の塩分が混入された場合、または外部から塩分の浸入がある場合にも、塗膜で鉄筋の発錆は抑制できることを示している。有塩部で無塗膜の柱10及び角柱14については腐食が著しく、ほぼ全面とも鉄筋は腐食している。

2-4 非破壊試験結果

自然電位の測定結果を、昭和59年9月（初期値）から63年12月（4.5年）までの経年変化として、図-4、5に示している。ここでは、柱の4面の測定結果を平均し、銅-硫酸銅電極（CSE）で示している。

自然電位と鋼材の腐食評価については、表-3に示す方法がASTM-C876に示されている²⁾。同様に、建設省総合技術開発プロジェクトの報告書にも腐食診断法（案）として表-2の値を一部修正して提案されている³⁾。

図-4の無塩部の柱4について、初年度から3.5年までは経年的に卑に移行しているが、3.5年から4.5年にかけての変化量が少ない。4.5年において第1面と4面にクラックが現れ、又、柱の中央部では、-350mvより卑の状態にあることから、鉄

表-3 ASTM-C876²⁾

自然電位(mv)	判 定	ランク
$E > -200$	測定時、測定点及びその周辺では、90%以上の確率で腐食は発生していない。	I
$-350 < E < -200$	測定時、測定点及びその周辺では、腐食の発生は不確定である。	II
$E < -350$	測定時、測定点及びその周辺では、90%以上の確率で腐食が発生している。	III

筋腐食と自然電位との相関性を表している。この柱の鉄筋腐食の状況は、未解体なので明らかではないが、表-2に示している柱5とほぼ同一条件であることから、腐食面積率は柱5の値と同程度と推定される。有塩部の柱10の自然電位の経年変化を図-5に示している。この柱には高濃度の塩分が存在するため、初期値で-400~-450mvの範囲にあり、1.5年後で-500mvの値を示している。この様に卑に大きく移行し続けることは鉄筋の腐食傾向を示し、3.5年後に解体したところ100%の鉄筋腐食率を示していた。その後鉄筋の錆を除去し、ポリマーセメントグラウト剤を圧力注入するプレパクトコンクリートで断面の修復を行なっている。修復後の自然電位は-200mv前後の貴の値に移行し安定している。

鉄筋の腐食状況を知ることと同時に、腐食速度を予測するために、3つの電気化学的特性値（自然電位、分極抵抗、液抵抗）をコンクリートの表面で同時に測定で

きる非破壊腐食探査法を採用し測定を行なっている⁴⁾。無塩部の柱4の第2面と4面の測定結果を図-6に、有塩部の柱10(断面修復後)の第1面と3面について図-7に示している。ここで、抵抗値は対数で、自然電位は飽和甘こう(カロメル)に対して負の値(SCE)で表している。

無塩部で無塗膜の柱(柱4,12および柱5の未補修部)で、分極抵抗は0.1~1.3k Ω の値を、有塩部で無塗膜の柱(柱9,14)は0.1~0.5k Ω の範囲を示している。下限値は両方とも同じであるが、無塩部の方の上限値が大きくなっている。無塩部と云えども外部からの塩分浸透で、濃度は高くなり、鉄筋の腐食は進行しているため、上限値に大きな差異が現れていない。上記の柱に対応する腐食面積率は、測定時期及び柱の位置は異っているが、無塩部に対して表-3の柱5が、有塩部に対しては補修前の柱10が対応している。図-7に示した柱10は、腐食部を除去して全断面を修復した後に測定したもので、

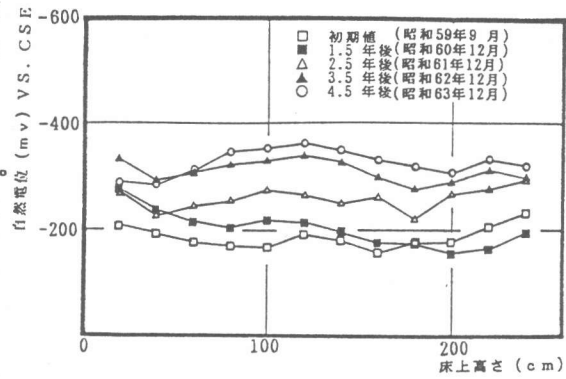


図-4 柱4の自然電位測定結果(無塩部)

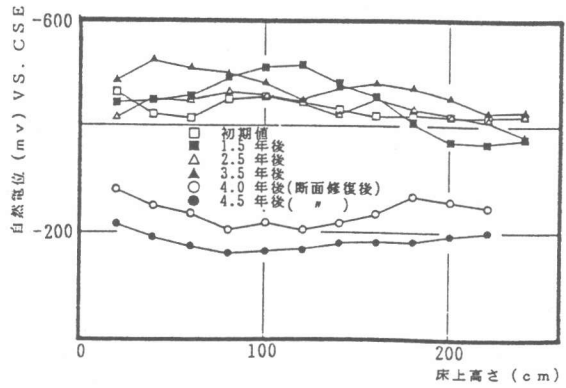


図-5 柱10の自然電位測定結果(有塩部)

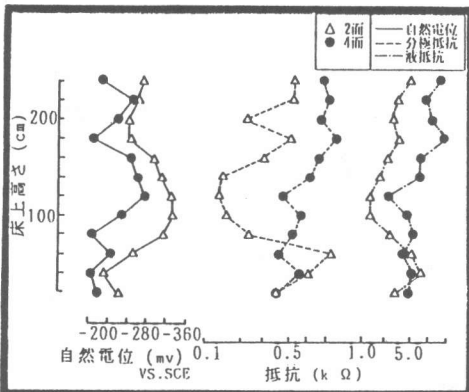


図-6 柱4-2,4面の電気化学的特性値の測定分布図(無塩部)

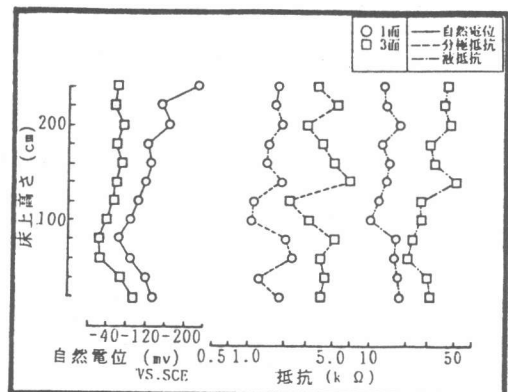


図-7 柱10-1,3面の電気化学的特性値の測定分布図(有塩部、補修後)

分極抵抗1.6 ~4.2kΩを示し、前述の無塗膜の柱の分極抵抗と比較すると、補修の効果が分極抵抗値に現れている。さらに、分極抵抗の高い所と自然電位の貴の状態との対応も示されている。

液抵抗について、無塩部の柱4 が2 ~9kΩを示しているのに対し、柱10の断面修復部は15~34 kΩと高い抵抗値を表している。

ここに示した自然電位及び分極抵抗から鉄筋の腐食状況を推定することが可能であるとの研究が報告されているが、未だ評価の方法としては確立されていない⁵⁾。同様の研究として、自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗率をパラメータとして鉄筋腐食評価方法の提案が報告されている⁶⁾。本研究の測定は今回が初めてであり、継続的に測定を行うことにより腐食速度および電気化学的特性値の経時的変化傾向を把握し、評価方法の確立が可能であると思われる。

3. まとめ

- (1) 塩分濃度分布から、海水の飛沫を強く受ける柱の塩分濃度が著しく大きく、鉄筋の防食に対して特別な配慮が必要である。また、アクリル系塗膜が遮塩効果のあることを示している。
- (2) 自然電位の経年的測定により、鉄筋腐食のモニタリングを有効的に行なえる。
- (3) 自然電位、分極抵抗、および液抵抗の3つの電気化学的特性値は、鉄筋腐食の傾向及びコンクリートの品質等を表し、非破壊試験法としての開発が期待される。

4. 謝辞

非破壊試験による特性値（自然電位、分極抵抗、液抵抗）の測定には、（財）日本建築総合試験所の田村博氏および永山勝氏に指導していただき、また、実験に際して琉球大学建設工学科の学生の協力があつたことを記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1)大城武、谷川伸、永井健太郎：鉄筋コンクリート構造物の暴露実験について、第10回コンクリート工学年次論文報告集、10-2、1988、pp.547~552.
- 2)ASTM C876-80: Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- 3)建設省、（財）国土開発技術研究センター：コンクリートの耐久性向上技術の開発 報告書（第一編） 1988、11 pp105-108
- 4)田村博、吉田正友：コンクリート中の鋼材の非破壊腐食探査法、第6回コンクリート工学年次講演会論文集 1984、pp.205~208.
- 5)鈴木計夫、外4名：電気化学的測定によるひびわれのないコンクリート中の鉄筋腐食の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 1988、10 pp393-394
- 6)望月紀保、外4名：コンクリート中の鉄筋腐食評価方法について、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集 JCI、1988、5 pp97-102